

機関番号：82110

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21740404

研究課題名 (和文) 高強度レーザー生成プラズマにおける高エネルギー負イオンのダイナミクス

研究課題名 (英文) Dynamics of high energy negative ions generated by intense laser pulses

研究代表者

中村 龍史 (NAKAMURA TATSUFUMI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹

研究者番号：40318796

研究成果の概要 (和文)：高強度レーザーをガスターゲットに照射すると高エネルギーの荷電粒子やX線、 γ 線が発生する。本研究では、ガス密度プラズマからの高エネルギー負イオン及び正イオンの加速過程の研究を行い、新しい加速過程の提案を行った。具体的には、最近の実験で観測された MeV を超える負イオンの加速過程を説明するクーロン爆縮モデルを提案し、実験結果の幾つかを説明することに成功した。また、ガスターゲットからの正イオン加速機構として磁気渦加速モデルを提案した。このモデルでは加速効率がシース場加速に比べ桁程度高いことから、医療応用等を目的としたレーザー駆動イオン源の研究開発の進展にも寄与すると考えられる。

研究成果の概要 (英文)：Irradiations of intense laser pulses on gas targets generate high energy charged particles, X-and gamma-rays, and negatively charged ions are also observed in recent experiments. In this study, we proposed Coulomb implosion mechanism which explains the acceleration mechanism of negative ions in laser-plasmas. We also proposed magnetic vortex acceleration, which is an efficient acceleration mechanism of positive ions from gas density plasmas. This mechanism enhances ion energy roughly ten-folds, which could contribute to development of compact laser-drive ion source.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：プラズマ物理学

科研費の分科・細目：プラズマ物理学

キーワード：レーザープラズマ相互作用、相対論プラズマ、レーザーイオン加速

1. 研究開始当初の背景

(1) 高強度レーザーを物質へ照射することで様々な高エネルギー量子線が発生することが分かっており、レーザーによるコンパクトな量子線源の開発が進めら

れている。近年の実験において、MeV を超える負イオンが所属機関も含め幾つかの研究所において観測され、新しい量子線源の可能性もあると考えられている。しかしその加速過程は理解されて

おらず、その解明が今後の実験研究の進展に不可欠である。

- (2) レーザーによる正イオン加速の研究は、それが医療用小型イオン源の実現に繋がることから、多くの研究機関で研究が進められている。これまでの研究では安定にビームを発生することができるシース場加速の研究が中心であった。しかしその加速効率が低いことから、医療応用を念頭においた場合には新しい加速機構の提案が求められている。

2. 研究の目的

- (1) 高強度レーザーを照射したガスプラズマ中での負イオン加速過程を解明し、これまでの実験結果を説明することを目的とする。
- (2) 加速効率の高い新しいイオン加速モデルを提案する。具体的には、高繰り返し運転が可能な 100TW 程度のレーザーを利用し、医療応用に必要な 200MeV の陽子発生を目的とする。

3. 研究の方法

- (1) ガスターゲットからの正イオン加速過程としてクーロン爆縮モデルが提案されている。このモデルを負イオンが存在する二成分プラズマに拡張し、負イオン運動を説明するクーロン爆縮モデルを提案する。
- (2) ガス密度プラズマ中に高強度レーザーを照射することで磁気双極子渦を形成し、その運動を利用する磁気渦イオン加速を提案する。イオンエネルギーのスケールリング則を導出し、高エネルギーイオン発生の可能性を調べる。

4. 研究成果

- (1) レーザー照射による電子の排斥により正イオンのみが存在するプラズマに対し、正イオンの加速を説明するクーロン爆縮モデルが提案されている。そこではイオン運動を与える自己相似解が得られている。このモデルを正負二成分プラズマへ拡張する事で、正イオンに加え負イオンの運動解を導出し、クーロン爆縮モデルとして提案した。理論モデルをシミュレーションにより検証し、両者は良い一致を示した。図 1(a)、1(b)はそれぞれ正イオン及び負イオンの動径密度分布の時間発展を示している。正イオンはクーロン爆縮により膨張する。この時、負イオンは中心へ一度爆縮した後膨張する。このため、負イオンのエネルギーの方が正イオンエネルギーに比べ低く、そのエネルギー比は電荷密度比であらわされることを示した。この結果は、実

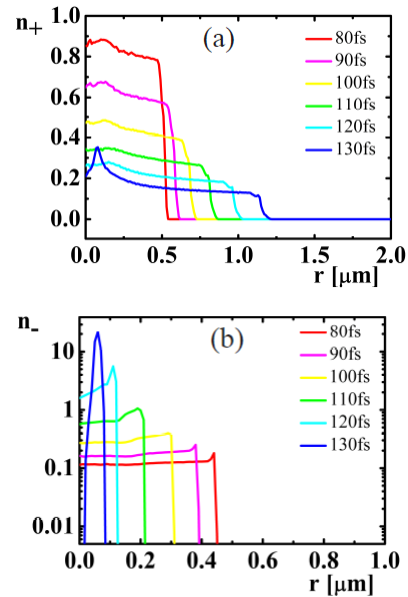


図 1 (a)正イオン(b)負イオンの動径分布

験結果とも良く一致したことから、クーロン爆縮モデルがある程度妥当であることを示唆している。今後の実験で得られるであろうエネルギースペクトルとの比較を行い、更なる検証を進める必要がある。

- (2) 磁気渦イオン加速では、ガス密度プラズマ中に高強度レーザー照射し、プラズマ中に安定な磁気双極子渦を形成する。そ

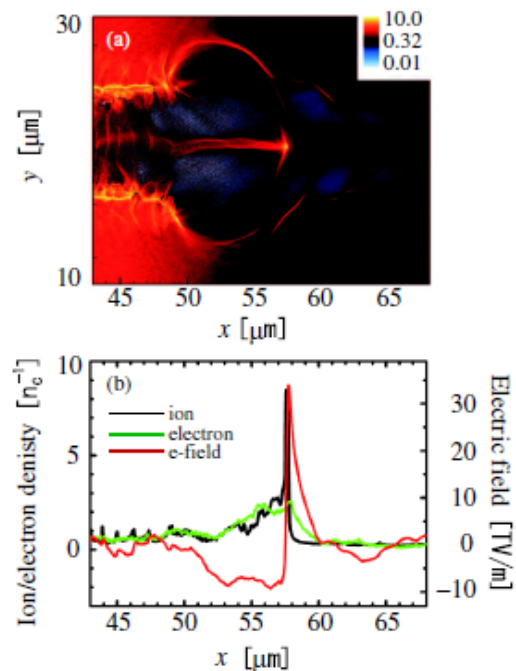


図 2 (a)磁気渦近傍でのイオン密度分布(臨界密度で規格化)(b)磁気渦軸上でのイオン、電子、及び電界分布。

の後の運動を制御することで、効率良くイオンを加速するものである。磁気渦の生成地点はレーザーエネルギーの枯渇地点とほぼ一致する。また、その空間サイズは表皮長程度であり、磁場強度等も評価することが可能である。磁気渦が負の密度勾配を持つプラズマ中に形成された場合、それは密度勾配に垂直及び低密度方向に膨張する。その結果、磁気圧勾配により押されたイオンが渦の周り及び軸上へ押し出される。図 2(a)はこのときのイオン密度分布を示している。イオンが磁気渦の周り及び軸上に圧縮されており、特に渦先端部においてイオンの高密度領域がみられる。この時の磁気渦軸上でのイオン(黒)、電子(緑)、静電界(赤)の分布を図 2(b)に示す。イオン密度が磁気渦先端部で急峻化しているのに対し、電子はイオンの高密度領域の前方(右側)にも分布している。これは電子が光速で磁場渦の周りを回転運動しているためである。この結果、イオン面前面において電荷分離が起こり、強い静電界が誘起されている。この静電界は磁気渦の膨張と共に前方に移動し、電界前方の背景イオンがその移動速度の2倍程度にまで加速される。この結果得られるイオンの最大エネルギーのレーザー出力依存性を図 3 に示す。黒線が理論モデルから得られる結果で、赤点が粒子シミュレーションの結果である。両者は良く一致している。また、青点は比較のためにシース場加速のシミュレーション結果を示してある。磁気渦加速では、シース場加速に比べ桁程度高いエネルギーが得られることを示唆している。また、医療応用に必要とされている 200MeV の陽子を発生するのに必要なレーザー出力が、およそ 100TW 程度であることも示している。このレーザー出力は現存する

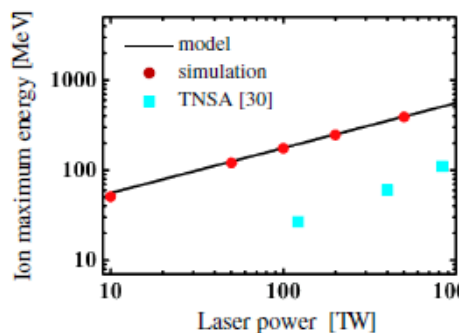


図 3 イオンエネルギーのレーザー出力依存性。実線が理論モデル、赤点がシミュレーション結果を示す。青はシース場加速のシミュレーション結果を示す。

高繰り返しレーザーで実現されている。また、磁気渦加速で得られるイオンの角度分布は高エネルギー成分で 10 度以下とシース場加速と比較しても小さく、またシミュレーションから見積もられる発生イオン数も医療用イオン源に必要な条件を満たしている。このように磁気渦加速はレーザー駆動イオン源に求められる条件の多くを満たしており、そこでの重要な候補の一つであると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

- ① T.Nakamura, S.Bulanov, T.Esirkepov, M.Kando, High energy ions from near-critical density plasmas via magnetic vortex acceleration, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 135002 (2010).
- ② T.Nakamura, M.Tampo, R.Kodama, S.Bulanov, M.Kando, Interaction of high contrast laser pulse with foam-attached target, *Phys. Plasmas* **17**, 113107 (2010).
- ③ T.Nakamura and K.Mima, Quasi-static electromagnetic pulse generated by ultra-intense laser pulses, *Eur. Phys. J. Special Topics* **175**, 195 (2009).
- ④ T.Nakamura, Y.Fukuda, A.Yogo, et al., Coulomb implosion mechanism of negative ion acceleration in laser plasmas, *Phys. Lett. A* **373**, 2584 (2009).
- ⑤ T.Nakamura, Y.Fukuda, and Y.Kishimoto, Ionization dynamics of cluster targets irradiated by x-ray free-electron-laser light, *Phys. Rev. A* **80**, 053202 (2009)
- ⑥ T.Nakamura, Y.Fukuda, A.Yogo, et al., High energy negative ion generation by Coulomb implosion mechanism, *Phys. Plasmas* **16**, 113106 (2009).
- ⑦ T.Nakamura, Y.Fukuda, A.Yogo, et al., Acceleration of negative ions by Coulomb implosion mechanism, *AIP Proc.* **1153**, 125 (2009).
- ⑧ K.Mima, A.Shunahara, H.Shiraga, H.Nishimura, H.Azechi, T.Nakamura, et al., FIREX project and effects of self-generated electric and magnetic fields on electron-driven fast ignition, *Plasma Phys. Cont. Fus.* **52**, 124047

- (2010).
- ⑨ S.Ter-Avetisyan, M.Schnuerer, P.Nickles, W.Sandner, M.Borghesi, T.Nakamura, K.Mima, Tomography of an ultrafast laser driven proton source, *Phys. Plasmas* **17**, 163101 (2010).
- ⑩ Y.Hayashi, A.Pirozhkov, M.Kando, Y.Fukuda, A.Faenov, K.Kawase, T.Pikuz, T.Nakamura, H.Kiriyama, H.Okada, S.Bulanov, Production of Xe K-shell X-rays by Laser-plasmas Interaction, *Opt. Lett.* **36**, 1614 (2011)
- ⑪ Y.Fukuda, A.Faenov, M.Tampo, T.Pikuz, T.Nakamura, et al., Energy increase in multi-MeV ion acceleration in the interaction of a short pulse laser with a cluster-gas target, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 165002 (2009).
- ⑫ S.Ter-Avetisyan, M.Schnuerer, P.Nickles, W.Sandner, T.Nakamura, K.Mima, Correlation of spectral, spatial, and angular characteristics of an ultra short laser driven proton source, *Phys. Plasmas* **16**, 043108 (2009).
- ⑬ A.Lei, L.Cao, X.Yang, T.Nakamura (全 12 名 9 番目), Guiding and confining fast electrons by transient electric and magnetic fields with plasma inverse cone. *Phys. Plasmas* **16**, 020702 (2009).
- ⑭ A.Faenov, N.Inogamov, T.Nakamura (全 15 名 12 番目), Low-threshold ablation of dielectrics irradiated by picosecond soft x-ray laser pulses, *App. Phys. Lett.* **94**, 231107 (2009).
- ⑮ H.Azechi, K.Mima, T.Nakamura (全 28 名 22 番目), Plasma physics and laser development for Fast-Ignition Realization Experiment (FIREX) Project, *Nuclear Fusion* **49**, 104024 (2009).
- ⑯ S.Ter-Avetisyan, M.Borghesi, M.Schnuerer, P.Nickles, W.Sandner, T.Nakamura, K.Mima, Characterization and control of ion sources from ultra-short high-intensity laser-foil interaction, *Plasma Phys. Cont. Fus.* **51**, 124046 (2009).
- ⑰ A.Faenov, T.Pikuz, T.Nakamura (全 30 名 15 番目), Submicron ionography of nanostructures using a femtosecond-laser-driven-cluster-based source, *App. Phys. Lett.* **95**, 101107 (2009).
- ⑱ A.Faenov, T.Pikuz, T.Nakamura (全 30 名 15 番目), Ionography of nanostructures with the use of a laser

plasma of cluster targets, *JETP Lett.* **89**, 485 (2009)

[学会発表] (計 5 件)

- ① T.Nakamura, S.Bulanov, T.Esirkepov, M.Kando, Ion acceleration in near-critical density plasmas via magnetic vortex acceleration, 2010 US-Japan workshop on laser-plasma interactions, Chicago, USA, Nov. 2010.
- ② T.Nakamura, Particle-in-Cell simulations for laser-matter interactions, 2nd UK-Japan winter school in high energy density science, Edinburgh, UK, Jan. 2011.
- ③ T.Nakamura, S.Bulanov, T.Esirkepov, M.Kando, High energy ion generation via magnetic vortex acceleration, 31st European conference on laser interaction with matter, Budapest, Hungary, Sept. 2010.
- ④ 中村 龍史、T.Esirkepov, J.Koga, S.Bulanov, 磁気双極子渦形成によるレーザーイオン加速、日本物理学会、岡山大学、2010年3月。
- ⑤ 中村龍史、福田祐仁、余語覚文、反保元伸、神門正城、林由紀雄、亀島敬、A.Pirozhkov, T.Esirkepov, T.Pikuz, A.Faenov, 大道博行, S.Bulanov、クーロン爆縮によるレーザープラズマからの負イオン加速、日本物理学会、熊本大学、2009年3月。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：クラスターガスターゲットを使った高効率イオン加速法、及び、加速装置

発明者：福田祐仁、中村龍史

権利者：日本原子力研究開発機構

種類：特許

番号：特願 2010-264833

出願年月日：2010年11月29日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 龍史 (NAKAMURA TATSUFUMI)

独立行政法人 日本原子力研究開発機構
研究副主幹

研究者番号：40318796

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし